2018年4月

# 文章编号: 2095-4980(2018)02-0239-05

# 基于盲源分离的单通道窄带干扰抑制算法

张 江,陈剑斌,朱 蕾,杨 霖

(国防科技大学 第 63 研究所, 江苏 南京 210007)

摘 要:针对窄带干扰下通信系统性能恶化的问题,提出一种基于过采样与盲源分离技术的 单通道窄带干扰抑制算法。该算法利用通信信号与窄带干扰的基带结构特征,通过过采样以及串 并变换构造出源信号为信息序列的盲源分离模型,并利用快速独立成分分析法实现信息码元的恢 复。仿真结果表明,该算法能有效对抗窄带干扰,抗干扰能力强。

关键词: 盲源分离; 窄带干扰; 干扰抑制; 单通道

中图分类号:TN911.4 文

文献标志码:A

doi: 10.11805/TKYDA201802.0239

# Narrow-band interference suppression algorithm based on blind sources separation in single channel

ZHANG Jiang, CHEN Jianbin, ZHU Lei, YANG Lin

(The 63th Institute of National University of Defense Technology, Nanjing Jiangsu 210007, China)

**Abstract:** To cope with the performance deterioration of communication system with narrow-band interference, an interference suppression scheme based on oversampling and Blind Sources Separation (BSS) in single channel is proposed. By exploiting the baseband structural features of narrow-band interference and communication signal, a BSS model is formed by oversampling and serial-to-parallel conversion. Then Independent Component Analysis(ICA) is utilized to solve the BSS problem and to recover the information symbols of communication signal. Simulation results further demonstrate that the scheme is effective to suppress narrow-band interference.

**Keywords:** Blind Sources Separation(BSS); narrow-band interference; interference suppression; single channel

窄带干扰具有功率大、能量集中而且易于生成的特点,因而被电子对抗装备广泛采用。即使对于具有较强 抗干扰能力的直扩通信系统,在强窄带干扰情况下,系统误比特率性能也会大大降低。目前对于窄带干扰,主要 是利用时域与变换域的一系列干扰抑制技术进行对抗。其中频域干扰抑制技术借助快速傅里叶变换的提出与实 现,已成为最高效、易于实现的干扰抑制手段<sup>[1-2]</sup>。然而在频域对干扰进行陷波处理时,会对通信信号频谱造成 损伤,无法在消除干扰的同时保持信号频谱的完整性,从而限制了其抗干扰能力。盲源分离技术依据各源信号相 互独立的假设,能够在未知源信号与传输参数的情况下,利用信号的统计特性,实现各源信号的恢复<sup>[3]</sup>。通信信 号与干扰来自不同的物理源,传递不同的信息,基本都满足独立性的要求,理论上保证了扰信分离的可能性。将 盲源分离技术用于通信抗干扰已有不少研究成果<sup>[4-6]</sup>,然而基于盲源分离的抗干扰技术大多要求多天线接收,这 一条件限制了其在现有装备中的应用。近年来,单通道盲分离技术得到了广泛关注并取得一些研究成果。由于单 通道盲分离是一个极端的欠定盲源分离问题,存在严重的信息不对称,因此现有算法都对源信号有所限制,并要 求有足够的先验信息或者源信号在变换域满足稀疏的假设。如 Boashash 等利用线性调频信号的频域稀疏特性, 采用时频联合峰值滤波的方法解决了多个线性调频信号的单通道盲分离问题<sup>[7]</sup>;张豪等利用通信信号的有限字符 集特征,采用逐幸存路径处理算法实现了 2 路相同符号速率高斯最小频移键控(Gaussian filtered Minimum Shift Keying,GMSK)信号的单通道盲分离<sup>[8]</sup>;路威等在源信号精确建模的基础上,建立了受扰信号的状态空间模型, 然后利用粒子滤波的方法,实现了二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)信号与线性调频干扰的分 离<sup>[9]</sup>。在实际受扰情况下,通信信号与窄带干扰在时频域上重叠,而且对干扰缺乏足够的先验信息,无法精确建模,因此无法利用上述方法实现扰信分离。还有一类单通道盲分离算法利用一定的变换将单路混合信号变换为多路混合信号,然后利用适定或超定盲分离算法解决单通道盲分离问题。如孙庆瑞等利用正交采样的方法,将单通 道盲分离问题转换为适定盲分离问题,实现了2路载波频率相同的通信信号的分离<sup>[10]</sup>,但该方法要求2路信号 具有相同的带宽,因此该方法同样无法实现窄带干扰与通信信号的分离。综上所述,因为通信信号与窄带干扰的 频谱相重叠,不仅带宽不同,而且载波频率也可能不同,因此以上算法都不适用于通信信号与窄带干扰的分离。 针对以上问题,本文提出一种新的单通道窄带干扰抑制算法。该算法利用通信信号与窄带干扰的基带结构特征, 通过过采样以及串并变换,构造出源信号为信息序列的超定盲源分离模型,然后利用独立成分分析法实现了信息 序列的恢复。仿真结果表明,该算法能够有效对抗窄带干扰。

# 1 数学模型

单通道数字通信系统中,当存在窄带干扰时,经过下变频到基带后,得到的受扰基带信号r(t)可表示为: r(t) = s(t) + j(t) + n(t) (1)

式中: s(t)表示通信信号经过信道卷积后的结果; j(t)表示窄带干扰; n(t)表示观测噪声。

# 1.1 通信信号模型

假设已完成下变频,因此s(t)可表示为:

$$s(t) = \sum_{m} d_m g(t - mT)$$
<sup>(2)</sup>

式中: $d_m$ 表示经过调制的信息符号, $m=1,2,3,\dots,M$ 表示接收到的符号个数;T表示符号周期;g(t)表示数字成型滤波、信道冲激响应以及匹配滤波合成的滤波效应,该滤波器的响应长度决定了码间串扰的长度,假设g(t)的响应长度为 $\tau$ ,则取

$$K = \left\lceil \frac{\tau}{T} \right\rceil \tag{3}$$

式中 $[\bullet]$ 表示向上取整运算。定义观测间隔长度为 1 个符号周期 T ,则在此观测间隔内,能够对 s(t)产生影响的 符号最多为 K +1 个。定义函数

$$g_k(t) = g(t - kT), \quad kT < t < (k+1), \quad k = 0, 1, \cdots, K$$
(4)

若对 s(t) 以符号速率  $n_s$  倍的采样频率进行采样,将第 m 个符号间隔内的  $n_s$  个采样作为一个向量  $s_m$ ,则有

$$\boldsymbol{s}_m = \sum_{k=0}^{K} \boldsymbol{d}_{m-k} \boldsymbol{g}_k = \boldsymbol{G} \boldsymbol{d}_m \tag{5}$$

式中:  $g_k$  表示由  $g_k(t)$  在观测间隔内对应的采样序列所构成的列向量,且  $G = [g_0, g_1, \dots, g_K]$ ,不随时间变化;  $d_m = [d_{m-K}, d_{m-K+1}, \dots, d_m]^T$ 表示对该符号间隔内信号波形产生作用的符号向量。

### 1.2 窄带干扰模型

任意窄带过程都可以表示为:

$$j(t) = a(t)\cos\left[2\pi\Delta ft + \phi(t)\right] \tag{6}$$

式中: a(t)表示干扰幅度;  $\Delta f$ 表示干扰频率与载波频率差;  $2\pi\Delta ft + \phi(t)$ 表示干扰的瞬时相位;  $\phi(t)$ 表示相位的瞬时跳变。一般窄带干扰的带宽不超过信号带宽的 1/3,  $a(t) = \phi(t)$ 相对于通信信号 s(t)的变化要慢得多,因此在一个符号间隔内可以认为  $a(t) = \phi(t)$ 近似保持恒定。定义:

$$\boldsymbol{c}_{0} = \left[1, \cos\left(2\pi\Delta f T_{s}\right), \cdots, \cos\left(2\pi\Delta f\left(n_{s}-1\right)T_{s}\right)\right]^{T}$$

$$\boldsymbol{s}_{0} = \left[0, \sin\left(2\pi\Delta f T_{s}\right), \cdots, \sin\left(2\pi\Delta f\left(n_{s}-1\right)T_{s}\right)\right]^{T}$$
(7)

式中 $T_s$ 表示以 $n_s$ 倍符号速率采样的采样周期。则窄带干扰j(t)在第m个符号间隔内的采样序列可近似表示为:  $j_m = a_m \cos\left[2\pi\Delta f(m-1)T + \phi_m\right] c_0 - a_m \sin\left[2\pi\Delta f(m-1)T + \phi_m\right] s_0$ (8)

#### 1.3 盲扰信分离模型

对受扰基带信号 r(t) 以 $n_s$  倍符号速率采样,则在第m 个符号间隔内,受扰序列 $r_m$ 可近似表示为:

$$\boldsymbol{r}_{m} = \boldsymbol{s}_{m} + \boldsymbol{j}_{m} + \boldsymbol{n}_{m} = \left[\boldsymbol{G}, \boldsymbol{c}_{0}, \boldsymbol{s}_{0}\right] \begin{vmatrix} \boldsymbol{d}_{m} \\ \boldsymbol{a}_{m} \cos\left[2\pi\Delta f\left(m-1\right)T + \boldsymbol{\phi}_{m}\right] \\ -\boldsymbol{a}_{m} \sin\left[2\pi\Delta f\left(m-1\right)T + \boldsymbol{\phi}_{m}\right] \end{vmatrix} + \boldsymbol{n}_{m} = \tilde{\boldsymbol{G}}\tilde{\boldsymbol{d}}_{m} + \boldsymbol{n}_{m}$$
(9)

对于一般的通信系统,可以提出以下合理假设: a)  $\{d_m\}$ 为独立同分布数字序列; b) 窄带干扰幅度  $a_m$  服从 瑞丽分布,  $\phi = 2\pi\Delta f(m-1)T + \phi_m$  服从  $[0,2\pi]$ 上的均匀分布。

在以上假设成立的基础上,  $\tilde{d}_m$ 中的各元素相互独立, 当满足 $n_s \ge K+3$ 时, 该问题等效为一盲源分离问题。 其中受扰信号向量 $r_m$ 为观测信号向量,  $\tilde{G} 与 \tilde{d}_m$ 分别为未知混合矩阵和未知源信号向量,  $n_m$ 为观测噪声向量。根据观测受扰信号向量 $r_m$ ,利用盲源分离的方法可以得到源信号向量 $\tilde{d}_m$ 的估计,该方法不仅可以实现干扰的消除,而且可以同时实现盲均衡与盲解调。

# 2 算法描述

下面对本算法的实施过程进一步详细说明。基于盲源分离单通道窄带干扰抑制算法的实施过程见图 1。



图1 算法流程框图

由图 1 可见, 该方法可分为 4 个步骤:

1) 对受扰基带信号 r(t)进行过采样,采样频率为  $f_s = \frac{n_s}{T}, (n_s \ge K+3)$ ,即每个符号采  $n_s$ 个点,得到基带受扰 采样信号  $r(nT_s)$ 。

2) 通过串并变换,构造式(9)中受扰信号向量r<sub>m</sub>。

3) 利用盲源分离算法进行扰信分离。本方案中采用 fastICA 算法<sup>[11]</sup>解决式(9)所构造的盲源分离问题。

4) 信号选择与联合判决。注意到源信号向量 $\tilde{d}_m$ 中不仅包括原始信号 $d_m$ ,还包括K个延时信号以及 2 路窄带干扰。由于这K+1路信号之间具有很强的移位相关特性,而另外 2 路窄带干扰与其独立,因此可以通过求各路

分离信号之间的移位相关,将 $\{a_m,m=0,1,\dots\}$ ,  $\{a_{m-1},m=1,2,\dots\},\dots,\{a_{m-K},m=K,K+1,\dots\}$ 对应的分离信号 挑选出来。将挑选出的K+1路信号同步后,采用联合 判决的方法,可以得到 $\{a_m,m=0,1,\dots\}$ 的精确估计  $\{\hat{a}_m,m=0,1,\dots\}$ 。

# 3 仿真结果

#### 3.1 窄带干扰抑制的可行性仿真

仿真中通信信号为基带 BPSK 信号,符号速率为 24 kbps, g(t)为升余弦函数,其持续时间为 2 倍的符 号周期,即 K = 1; 窄带干扰的频偏为 2 kHz,干扰带 宽为 2 kHz,干信比为 30 dB;  $n_s = 15$ ,即采样频率  $f_s = 360$  kHz。基带通信信号与受扰信号的波形见图 2,由 图可见干扰信号完全将通信信号湮没。



采用本文提出的扰信分离算法对受扰信号进行处理。考虑到式(9)所示的盲分离模型是在假设 *a*(*t*) 与 *φ*(*t*) 在一 个符号间隔内近似保持恒定的假设下建立的,当干扰功率远大于信号功率时,该模型必然存在一定误差,而该误 差可以建模为其他源信号,其个数可以利用主成份分析(Principal Components Analysis, PCA)的方法<sup>[12]</sup>进行确定。 在此,分离信号的个数被设定为6个,分离出的各路信号见图3。图3中前6路为分离出的各路信号,最后1路 为发送的原始信息码元。可见第4路分离信号与原始信息码元波形极为相近;而第2路分离信号与原始信息码元 存在一个符号时延,以及反相关系,该反相是由盲源分离固有的相位不确定性引起的。由此可见,采用本算法可



# 3.2 不同干信比下的干扰抑制性能仿真

仿真参数同上,调整干扰功率,当干信比从 10 dB 变化至 50 dB 时,利用本干扰抑制算法与采用文献[1] 中 256 倍扩谱后进行频域干扰抑制的误比特率性能见 图 4。本文所提算法性能整体优于文献[1]干扰抑制的 性能。本文所提算法的误比特率性能随干信比的增加 不断恶化,但增加比较缓慢。而文献[1]干扰抑制算法 的误比特率在干信比小于 30 dB 时很平坦,当干信比 大于 30 dB 后,急剧增加。同时,由图可见本算法在 干信比高达 35 dB 时,误比特率仍保持10<sup>-3</sup>的水平, 说明该算法在不扩展信号带宽的条件下,也具有较强 的抗干扰能力。

### 3.3 不同干扰带宽下的干扰抑制性能仿真

仿真参数同上,在干信比保持 30 dB 的条件下, 调整窄带干扰带宽,当干扰带宽从 1 kHz 变换至 6 kHz

 $10^{\circ}$ -proposed algorithm -spread spectrum+interference suppression 10-10-2 mminnmp . ratio/% • error · E 10 โกรกรรมที่สาวกรรมการสาวกรรมที่สาวกรรมที่สาวกรรมที่สาวกรรมที่สาวกระ  $10^{-10}$ 10-6 10 15 2025 30 35 45 50 interference to signal ratio/dB Fig.4 Curves of BER vs. interference to signal ratio 图4 算法误比特率随干信比变换曲线

时,利用本干扰抑制算法后的误比特率性能见图 5。随着干扰带宽的增加,误比特率性能不断下降。因为式(9) 所示的盲源分离模型是建立在每个符号周期内干扰幅度缓变的基础上,随着干扰带宽的不断增加,其幅度的变化 越来越快,此时式(9)建立的盲源分离模型的误差越来越大,性能不断恶化。

# 4 结论

本文提出一种新的基于单通道盲源分离的窄带干扰抑制算法,不同于之前的盲扰信分离算法,该算法仅需要单路观测信号, 通过过采样以及串并变换,将干扰抑制问题转化为超定盲源分离 的求解问题,然后利用快速独立成分分析法实现信息码元的恢 复。该算法可以在不扩展信号带宽的条件下,极大地提高通信系 统的抗窄带干扰能力。通过仿真可以看出,该算法能够有效对抗 窄带干扰,误比特率随干信比提高,增加比较缓慢,当干信比高 达 35 dB时,误比特率仍保持10<sup>-3</sup>的水平,但算法性能随干扰带 宽的增加逐步恶化。



# 参考文献:

- [1] 李健伟,李志强,朱文明,等. 基于误码率准则的窄带干扰抑制算法性能分析[J]. 飞行器测控学报, 2014,33(5):435-440.
   (LI Jianwei,LI Zhiqiang,ZHU Wenming, et al. Analysis of the performance of narrow-band interference suppression algorithm based on BER criteria[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2014,33(5):435-440.)
- [2] 李平博,王璐,严玉国.改进的频域窄带干扰抑制方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2015,16(2):78-81. (LI Pingbo, WANG Lu, YAN Yuguo. The improved method for suppressing the frequency domain narrowband interference[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2015,16(2):78-81.)
- [3] 张发启. 盲信号处理及应用[M]. 西安:电子科技大学出版社, 2006. (ZHANG Faqi. Blind signal processing and application[M]. Xi'an:Xidian University Press, 2006.)
- [4] ZHANG Jiang, ZHANG Hang, CUI Zhifu. Dual-antenna based blind joint hostile jamming cancellation and multi-user detection for uplink of asynchronous DS-CDMA systems[J]. IET Communications, 2013,7(10):911-921.
- [5] 段玉玲,张杭.改进的 EMD 算法及其在含噪盲扰信分离中的应用[J].系统仿真技术, 2011,7(2):142-147. (DUAN Yuling, ZHANG Hang. Improved EMD algorithm and its application to blind interference-signal separation with noise[J]. System Simulation Technology, 2011,7(2):142-147.)
- [6] BERTRAND A, MOONEN M. Distributed canonical correlation analysis in wireless sensor networks with application to distributed blind source separation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015(63):4800-4813.
- [7] BOASHA B,MESBAN M. Signal enhancement by time frequency peak filtering[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004,52(4):929-937.
- [8] 张豪,杨育红,辛刚,等. GMSK 混合信号的 PSP 盲分离算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(1):142-147. (ZHANG Hao,YANG Yuhong,XIN Gang,et al. PSP blind separation algorithm for GMSK mixed signals[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(1):142-147.)
- [9] 路威,张邦宁,陆溪平.时变幅度 LFM 干扰下的单通道盲分离算法研究[J]. 信号处理, 2013,29(4):411-418. (LU Wei,ZHANG Bangning,LU Xiping. Research on single-channel blind separation algorithm for time-varying amplitude LFM interference[J]. Journal of Signal Processing, 2013,29(4):411-418.)
- [10] 孙庆瑞. 通信信号的单通道盲分离技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2013. (SUN Qingrui. Single-channel blind separation technology of communication signals[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2013.)
- [11] HYVARINEN A. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1999,10(3):626-634.
- [12] Agilent Technologies. Principal components analysis[EB/OL]. (2016-08-08). http://www.doc88.com/p-1846081693836.html, 2005.

### 作者简介:



**张 江**(1984-),男,太原市人,博士,工 程师,主要研究方向为盲信号处理、通信抗干扰 以及射频信号处理.email:738756576@qq.com. **朱 蕾**(1983-), 女, 江西省宜春市人, 工程师, 主要研究方向为微波通信.

**陈剑斌**(1986-),男,福建省龙岩市人,工程师, 主要研究方向为射频技术、认知无线电.

**杨** 霖(1974-),男,山东省海阳市人,工程师, 主要研究方向为微波通信.

243